枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠生长性能、器官指数、养分利用率和器官中微量元素含量的影响[1]

黄燕萍[1,2]　王宝维[1,2*]　刘国栋[1,2]　葛文华[2]　张名爱[1,2]　岳　斌[2]

（1.青岛农业大学食品科学与工程学院，青岛 266109；2.国家水禽产业技术体系营养与饲料功能研究室，青岛 266109）

摘　要：本试验旨在研究枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠生长性能、器官指数、养分利用率和器官中微量元素（锌、铜、铁）含量的影响，以确定枯草芽孢杆菌锌的作用效果和微量元素减量化添加的可行性。选取同期受孕母鼠进行先天性缺锌大鼠模型建立试验，即模型组大鼠从怀孕第 10 天开始饲喂缺锌饲粮（锌水平 13.00 mg/kg），对照组大鼠同期饲喂正常饲粮(锌水平 38.00 mg/kg)，持续到哺乳期结束。建模成功后，选择模型建立试验对照组中 24 日龄正常大鼠幼鼠 18 只作为正常组（Ⅰ组，锌水平 13.00 mg/kg），饲喂正常饲粮；另外，选取模型建立试验模型组中 24 日龄先天性缺锌大鼠幼鼠 90 只，随机分成 5 个试验组，分别为缺锌组（Ⅱ组，锌水平 13.00 mg/kg）、硫酸锌（$ZnSO_4$）组（Ⅲ组，锌水平 38.00 mg/kg）和低（Ⅳ组，锌水平 15.00 mg/kg）、中（Ⅴ组，锌水平 30.00 mg/kg）、高剂量枯草芽孢杆菌锌组（Ⅵ组，锌水平 45.00 mg/kg），均饲喂缺锌饲粮，每组 3 个重复，每个重复 6 只大鼠。试验期 5 周。结果表明：1）与Ⅰ组比较，Ⅱ组体重（BW）和平均日采食量（ADFI）显著或极显著降低（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。与Ⅱ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组 BW、ADFI 显著或极显著增加（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。与Ⅲ组比较，Ⅴ组 BW、平均日增重（ADG）、ADFI 显著增加（$P < 0.05$）。2）与Ⅰ组比较，Ⅱ组的肝脏指数显著降低（$P < 0.05$）。与Ⅱ组比较，Ⅴ、Ⅵ组的心脏、肝脏指数显著或极显著增加（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。与Ⅲ组比较，Ⅵ组的心脏指数显著增加（$P < 0.05$），Ⅴ组的心脏、肾脏指数显著或极显著增加（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$），Ⅳ组的肾脏指数显著增加（$P < 0.05$）。3）与Ⅰ组比较，Ⅱ组的粗蛋白质（CP）、粗脂肪（EE）、粗纤维（CF）、中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）、钙、锌利用率均显著或极显著降低（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。与Ⅱ组比较，Ⅴ、Ⅵ组的 CP、CF、EE、NDF、ADF、钙、锌利用率显著或极显著增加（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。与Ⅲ组比较，Ⅳ组的 EE 利用率显著升高（$P < 0.05$），Ⅴ组的 EE、CF、NDF、ADF、锌、钙利用率均极显著增加（$P < 0.01$），Ⅵ组的 EE、CF、NDF、ADF、锌利用率显著或极显著增加（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。4)与Ⅰ组比较，Ⅱ组的食入氮、沉积氮、氮利用率均显著或极显著降低（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。与Ⅱ组比较，Ⅴ、Ⅵ组的食入氮、沉积氮、氮利用率显著或极显著升高（P

收稿日期：2018-04-19
基金项目：国家水禽产业技术体系专项基金(CARS-43-11)
作者简介：黄燕萍(1993-)，女，山东临沂人，硕士研究生，研究方向为营养与保健。E-mail: zipingangel@qq.com
*通信作者：王宝维，教授，硕士生导师，E-mail: wangbw@qau.edu.cn

< 0.05 或 $P < 0.01$）。与Ⅲ组比较，Ⅳ的食入氮、沉积氮显著降低（$P < 0.05$），Ⅴ组的食入氮、沉积氮显著升高（$P < 0.05$）。5）与Ⅰ组比较，Ⅱ组心脏、肝脏、肾脏中锌含量显著或极显著降低（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。与Ⅱ组比较，Ⅴ、Ⅵ组心脏、肝脏、肾脏中锌含量显著或极显著增加（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。与Ⅲ组比较，Ⅳ组心脏、肾脏中锌含量显著降低（$P < 0.05$），Ⅳ、Ⅵ组肝脏中锌含量显著或极显著降低（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。6）与Ⅰ组比较，Ⅱ组心脏、脑、肾脏中铜含量显著降低（$P < 0.05$）。与Ⅱ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组心脏中铜含量显著升高（$P < 0.05$）。与Ⅲ组比较，Ⅳ、Ⅵ组脑中铜含量显著降低（$P < 0.05$），Ⅴ组心脏中铜含量显著升高（$P < 0.05$）。7）与Ⅰ组比较，Ⅱ组心脏、肝脏、肾脏中铁含量显著或极显著降低（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。与Ⅱ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组心脏、肝脏、肾脏中铁含量显著或极显著增加（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。与Ⅲ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组肝脏中铁含量显著或极显著降低（$P < 0.05$ 或 $P < 0.01$）。由此可见，枯草芽孢杆菌锌能够促进先天性缺锌大鼠生长发育，提高肝脏指数、心脏指数和养分利用率，调节微量元素的分布，作用效果优于 $ZnSO_4$，且降低了饲粮中锌添加量。

关键词：枯草芽孢杆菌锌；先天性缺锌；生长发育；养分利用率；微量元素

中图分类号：S816.71　　　　文献标识码：　　　　文章编号：

锌是人体内多种酶的催化剂，是参与细胞分裂的重要物质，对动物、孕妇、婴儿的生长发育具重要意义，尤其是对孕妇和婴儿[1-2]。孕期缺锌会对导致孕妇流产、胎儿宫内发育迟缓、畸形，甚至是死胎的发生。并且婴幼儿先天性缺锌会出现厌食、注意力不集中、消瘦等症状，会导致生长发育迟缓、智力降低、免疫力降低等现象[3-5]。王德才等[6]研究发现，缺锌或高锌大鼠的体重（BW）、饲料效率均低于正常组，并影响相关器官指数。Wedekind 等[7]和王代刚[8]研究表明，饲粮中添加外源锌能显著影响组织器官、血清中锌含量及血清碱性磷酸酶（AKP）活性。另外，崔志英等[9]研究表明，动物对有机锌的生物利用率高于无机锌。目前，国内外对微生物富集微量金属元素的研究主要集中在酵母菌对环境中的铜离子（Cu^{2+}）、锌离子（Zn^{2+}）、镉离子（Cd^{2+}）等金属离子的吸附[10]。而赵佳英等[11]研究表明，枯草芽孢杆菌能够富集锌离子，能够完成无机锌向有机锌的转化。枯草芽孢杆菌锌作为一种新型补锌添加剂，国内外研究相对较少；利用枯草芽孢杆菌锌干预先天性缺锌大鼠的研究目前还处于空白。本试验以先天性缺锌大鼠为研究对象，旨在研究枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠生长性能、器官指数、养分利用率和器官中锌、铜、铁含量的影响，确定枯草芽孢杆菌锌的作用效果和锌减量化添加的可行性。

1　材料与方法

1.1　试验材料

枯草芽孢杆菌锌：由国家水禽产业技术体系营养与饲料功能研究室提供，枯草芽孢杆菌菌活数 3×10^9 CFU/g，锌含量 2 511.55 mg/kg。食品级硫酸锌($ZnSO_4$)：购自湖北金铭洲化学有限公司，分析纯，七水合硫酸锌（$ZnSO_4\cdot7H_2O$）含量不少于 99.5%。AKP、金属硫蛋白（MT）、铜锌超氧化物歧化酶（Cu-Zn SOD）试剂盒：均购自南京建成生物工程研究所。

1.2　主要仪器

台式高速大容量冷冻（湘仪离心机仪器有限公司）、医用低温保存箱(DW-86L388J 青岛海尔特种电器有限公司)、超级恒温水浴锅(DKB-501，上海精宏试验设备有限公)、全自动酶标仪（Multiskan MK3）、电子天平(AR1140，奥豪斯国际贸易有限公司)、微电脑自动热量计（WZR-1T）、等离子体发射光谱仪（ICP，美国 PE 公司）、真空干燥机（FD-1A-50，北京博医康实验仪器有限公司）、凯氏定氮仪（FOSS TECATOR）、脂肪测定仪（SZC-C，上海纤检仪器有限公司）、纤维素分析仪（ANKOM TECHNOLOGY）。

1.3　试验饲粮

基础饲粮以玉米淀粉、大豆分离蛋白、蔗糖等为基础进行配制，经检测基础饲粮中锌水平为13.00 mg/kg，为缺锌饲粮；正常饲粮是在缺锌饲粮基础上添加$ZnSO_4$，使饲粮锌水平达到38.00 mg/kg。基础饲粮组成及营养水平见表2。

表 2　基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 2　Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis)　%

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
玉米淀粉 Corn starch	45.40
大豆分离蛋白 Soybean-extracted protein	3.00
纤维素 Cellulose	1.00
酪蛋白 Casein	17.00
豆油 Soybean oil	4.00
碳酸钙 $CaCO_3$	0.60
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	2.70
DL-蛋氨酸 *DL*-Met	0.60
胆碱 Choline	0.20
蔗糖 Cane sugar	23.00

食盐 NaCl	0.20
微量元素 Trace elements[1)]	2.00
多维素 Multivitamin[2)]	0.30
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels[3)]	
代谢能 ME/（MJ/kg）	15.94
粗蛋白质 CP	20.07
粗纤维 CF	1.59
粗脂肪 EE	3.86
钙 Ca	1.05
有效磷 AP	0.73
锌 Zinc/（mg/kg）	13.00

1) 微量元素（不含锌）为每千克饲粮提供 The trace elements (without zinc) provided the following per kg of the diet：MgO 272.727 3 g，$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 25 g，K_2SO_4 612.881 7 g，$MnSO_4 \cdot H_2O$ 16.95 g，KI 0.07g，$NaSeO_3$ 0.022 2 g，$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 2 g，$CaCO_3$ 70.36 g。

2) 多维素为每千克饲粮提供 The multivitamin provided the following per kg of the diet：VA 14 000 IU，VD_3 1 500 IU，VE 120 IU，VK 5 mg，VB_1 12 mg，VB_2 12 mg，烟酸 nicotinic acid 60 mg，VB_6 12 mg，生物素 biotin 0.2 mg，泛酸 pantothenate 24 mg，叶酸 folic acid 6 mg。

3) 锌水平、代谢能为实测值，其他营养水平为计算值。Zinc and ME were measured values, while other nutrient levels were calculated values.

1.4 试验设计

选用健康 SD 大鼠，分为 2 个试验：先天性缺锌幼龄大鼠模型建立试验和缺锌大鼠后天干预试验。

1.4.1 先天性缺锌幼龄大鼠模型建立试验

选取同期怀孕雌性SD大鼠72只，分为模型组和对照组2个组，每组6个重复，每个重复6只。从怀孕10 d开始试验，模型组大鼠孕期饲喂缺锌饲粮，对照组大鼠孕期饲喂正常饲粮，持续到哺乳期结束。

造模结束后，模型组和对照组各抽取 12 只幼鼠，禁食 12 h，取血清和肝脏样品，并检测生长指标、肝脏锌含量及血清生化指标，验证模型是否建立成功。

1.4.2 缺锌大鼠后天干预试验

建模成功后，首先选择模型建立试验对照组中 24 日龄正常大鼠幼鼠 18 只，作为后天干预试验正常组（Ⅰ组），饲喂正常饲粮；另外，选取模型建立试验模型组中 24 日龄先天性缺锌大鼠幼鼠 90 只，随机分成 5 个试验组，开展后天干预试验，分为缺锌组（Ⅱ组）、$ZnSO_4$组（III组）和低（Ⅳ组）、中（Ⅴ组）、高剂量枯草芽孢杆菌锌组（Ⅵ组），均饲喂缺锌饲粮；每组 3 个重复，每个重复 6 只。采取灌胃方式补充锌源，Ⅰ、Ⅱ组灌胃去离子水，III组灌胃 $ZnSO_4$ 溶液，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组灌胃枯草芽孢杆菌锌（需要用去离子水稀释），灌胃量为按大鼠每 10 g 体重灌胃 0.2 mL/d。试验期 5 周。干预期大鼠分组饲喂情况如表 1 所示。

表 1　干预期大鼠分组饲喂情况

Table 1　Group feeding situation during the trial intervention

组别 Groups	饲粮类型 Diet type	锌水平 Zinc level/（mg/kg）	灌胃类型 Gavage type
正常组 Normal group （Ⅰ）	正常饲粮	38	去离子水
缺锌组 Zinc deficiency group（Ⅱ）	缺锌饲粮	13	去离子水
$ZnSO_4$组 $ZnSO_4$ group （III）	缺锌饲粮	38	$ZnSO_4$溶液
低剂量枯草芽孢杆菌锌组 Low-dose *Bacillus subtilis*-zinc group （Ⅳ）	缺锌饲粮	15	低剂量枯草芽孢杆菌锌
中剂量枯草芽孢杆菌锌组 Mid-dose *Bacillus subtilis*-zinc group (Ⅴ)	缺锌饲粮	30	中剂量枯草芽孢杆菌锌
高剂量枯草芽孢杆菌锌组 High-dose *Bacillus subtilis*-zinc group (Ⅵ)	缺锌饲粮	45	高剂量枯草芽孢杆菌锌

1.5　饲养管理

试验期间，大鼠自由摄食、饮水（去离子水），室内温度（22±2）℃，相对湿度（55±5）%，室内通风良好。每天观察大鼠的精神状态，活动情况，记录摄食量和饮水量，并且每周称量1次体重。

1.6　动物屠宰及取样

饲养5周后，对大鼠禁食12 h后，称量体重、体长，并用乙醚麻醉，采用眼球取血，3 000

r/min离心15 min，取血清-80 ℃保存。处死大鼠后，迅速测量体长并分离心脏、肝脏、脾脏、肾脏等器官，置于冷生理盐水中洗净后用滤纸吸干其表面液体进行称重。

1.7 测试指标及方法

1.7.1 生长性能指标测定

每周最后1d 08:00以重复为单位进行空腹称重，称重前10 h停料不停水。试验结束后，统计并计算大鼠体重、平均日增重（ADG）、平均日采食量（ADFI）、料重比（F/G）。

待大鼠解剖后，取其心脏、肝脏、脾脏、肾脏等器官，用生理盐水清洗后，测定湿重，并计算器官指数：

器官指数（%）=100×脏器湿重（g）/体重（g）。

1.7.2 养分利用率测定

待测饲料粉碎过40目筛，混匀，低温干燥保存。粪类在65~75 ℃烘箱中烘干，自然状态下回潮24 h，制成风干粪样，然后用小型万能粉碎机将粪样粉碎。

氮和粗蛋白质（CP）含量采用凯氏定氮分析仪进行测定，粗脂肪（EE）含量采用乙醚浸提法进行测定，粗纤维（CF）、中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）含量采用酸碱洗涤法进行测定，锌、钙含量采用等离子体发射光谱仪（ICP）进行测定。

营养物质利用率计算公式：

氮利用率（%）=[（饲料中氮含量-排泄物中氮含量）/饲料中氮含量]×100；

CP利用率（%）=[（饲料中CP含量-排泄物中CP含量+内源CP含量）/饲料中CP含量]×100；

EE利用率（%）=[（饲料中EE含量-排泄物中EE含量）/饲料中EE含量]×100；

CF利用率（%）=[（饲料中CF含量-排泄物中CF含量）/饲料中CF含量]×100；

NDF利用率（%）=[（饲料中NDF含量-排泄物中NDF含量）/饲料中NDF含量]×100；

ADF利用率（%）=[（饲料中ADF含量-排泄物中ADF含量）/饲料中ADF含量]×100；

锌利用率（%）=[（饲料中锌含量-排泄物中锌含量）/饲料中锌含量]×100；

钙利用率（%）=[（饲料中钙含量-排泄物中钙含量）/饲料中钙含量]×100。

1.7.3 器官中锌、铁、铜含量测定

将器官组织干燥至恒重，用湿法消化法消化，过滤定容。具体方法如下：准确称取0.5 g器官组织样品于三角烧瓶中，用少量超纯水润湿后加10 mL硝酸和2 mL高氯酸，混匀，盖上表面皿放置过夜，置于可调电炉上低温消煮至近干，将溶液无损失地转移到100 mL容量瓶中，用超纯水定容至刻度，混匀待测，并做空白矫正。

1.8 统计分析

采用 SPSS 17.0 软件中单因素方差分析(one-way ANOVA，LSD)和 *t* 检验 2 种方法分析数据。试验数据以平均值表示，误差以标准误（SEM）表示。P<0.05 和 P<0.01 分别为差异显著和极显著水平。

2 结果与分析

2.1 幼龄大鼠缺锌模型的建立

由表 3 可知，经过缺锌饲粮干预后，模型组的体重、体长显著低于对照组（P < 0.05），其肝脏锌含量和血清 MT 含量及 AKP、Cu Zn-SOD 活性显著低于对照组（P<0.05）。结果表明，幼龄大鼠缺锌模型建立成功。

表3 低锌饲粮对幼龄大鼠生长及血液指标的影响

Table 3 Effects of low-zinc diet on growth and blood parameters of young rats

项目 Items	组别 Groups		SEM	*P* 值 *P*-value
	对照组 Control group	模型组 Model group		
体重 BW/g	51.62[a]	39.54[b]	2.721	<0.001
体长 BL/cm	20.30[a]	18.36[b]	0.445	0.001
肝脏锌含量 Liver zinc content/(mg/kg)	42.98[a]	32.65[b]	2.313	<0.001
碱性磷酸酶 AKP/（金氏单位/dL）	50.86[a]	38.41[b]	2.807	<0.001
金属硫蛋白 MT/（ng/mL）	10.12[a]	7.48[b]	0.593	<0.001
铜锌超氧化物歧化酶 Cu-Zn SOD/（U/mL）	203.67[a]	170.67[b]	7.418	<0.001

同行数据肩标相同小写字母或无字母表示差异不显著(P>0.05)，相邻小写字母表示差异显著(P<0.05)，相间小写字母表示差异极显著(P<0.01)。下表同。

In the same row, values with the same small or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05), while with adjacent small letter superscripts mean significant difference (P<0.05), and with alternate small letter superscripts mean significant difference (P<0.01). The same as below.

2.2 枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠生长发育的影响

2.2.1　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠生长性能的影响

由表4可知，与Ⅰ组（正常组）比较，Ⅱ组（缺锌组）大鼠体重极显著降低（$P<0.01$），ADFI显著降低（$P<0.05$），F/G、ADG差异不显著（$P>0.05$）。与Ⅱ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组（低、中、高剂量枯草芽孢杆菌锌组）大鼠F/G差异均不显著（$P>0.05$）；Ⅳ组大鼠体重、ADFI显著增加（$P<0.05$），ADG差异不显著（$P>0.05$）；Ⅴ、Ⅵ组大鼠体重、ADFI极显著增加（$P<0.01$），ADG显著增加（$P<0.05$）。与III组（$ZnSO_4$组）比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠F/G差异均不显著（$P>0.05$）；Ⅳ组大鼠体重、ADFI显著降低（$P<0.05$），ADG差异不显著（$P>0.05$）；Ⅴ、Ⅵ组大鼠体重、ADG显著增加（$P<0.05$）；Ⅴ组大鼠ADFI显著增加（$P<0.05$），Ⅵ组ADFI差异不显著（$P>0.05$）。

以上结果表明，大鼠先天性缺锌能够显著降低采食量，使生长发育缓慢，体重降低；枯草芽孢杆菌锌能够促进缺锌大鼠的生长发育，并且中、高剂量枯草芽孢杆菌锌对缺锌大鼠生长发育促进效果优于$ZnSO_4$。

表 4　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠生长性能的影响

Table 4　Effects of *Bacillus subtilis*-zinc on growth performance of congenital zinc deficiency rats

项目 Items	组别 Groups						SEM	*P* 值 *P*-value	
	I	II	III	IV	V	VI		线性 Linear	二次 Quadratic
体重 BW/g	146.16^{b}	132.73^{d}	144.69^{b}	140.52^{c}	155.72^{a}	153.87^{a}	1.926	<0.001	<0.001
平均日增重 ADG/g	3.18^{b}	3.07^{b}	3.20^{b}	3.16^{b}	3.74^{a}	3.68^{a}	0.071	<0.001	0.032
平均日采食量 ADFI/g	9.04^{bc}	8.60^{d}	9.09^{b}	8.91^{c}	9.53^{a}	9.17^{b}	0.070	<0.001	<0.001
料重比 F/G	2.85	2.99	2.74	2.84	2.54	2.49	0.157	0.995	0.570

2.2.2　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠器官指数的影响

由表5可知，与Ⅰ组比较，Ⅱ组大鼠的心脏、脾脏、肾脏和肺脏指数差异不显著（$P>0.05$），肝脏指数显著降低（$P<0.05$）。与Ⅱ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠的脾脏、肾脏、肺脏指数差异不显著（$P>0.05$），肝脏指数显著升高（$P<0.05$）；Ⅵ组大鼠的心脏指数显著增加（$P<0.05$），Ⅴ组极显著增加（$P<0.01$），Ⅳ组无显著差异（$P>0.05$）。与III组比

较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠的肝脏、脾脏、肺脏指数差异不显著（$P>0.05$）；Ⅵ组大鼠的心脏指数显著增加（$P<0.05$），肾脏指数差异不显著（$P>0.05$）；Ⅴ组大鼠的心脏指数极显著增加（$P<0.01$），肾脏指数显著增加（$P<0.05$）；Ⅳ组大鼠的心脏指数无显著差异（$P>0.05$），肾脏指数显著增加（$P<0.05$）。

以上结果表明，大鼠先天性缺锌会显著影响肝脏的发育；枯草芽孢杆菌锌对缺锌大鼠的脾脏、肾脏、肺脏发育影响不显著，能显著促进肝脏发育，并且中、高剂量枯草芽孢杆菌锌能显著促进心脏的发育；中、高剂量枯草芽孢杆菌锌对缺锌大鼠心脏修复效果优于$ZnSO_4$，低、中剂量枯草芽孢杆菌锌对缺锌大鼠肾脏修复效果优于$ZnSO_4$。

表 5　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠器官指数的影响

Table 5　Effects of *Bacillus subtilis*-zinc on organ index of congenital zinc deficiency rats　%

项目 Items	组别 Groups						SEM	P值 P-value	
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ		线性 Linear	二次 Quadratic
心脏指数 Heart index	0.45^{c}	0.43^{c}	0.44^{c}	0.43^{c}	0.54^{a}	0.49^{b}	0.010	<0.001	0.002
肝脏指数 Liver index	3.03^{a}	2.85^{b}	3.07^{a}	3.14^{a}	3.12^{a}	3.02^{a}	0.029	0.060	0.223
脾脏指数 Spleen index	0.34	0.36	0.36	0.37	0.38	0.36	0.006	0.208	0.390
肾脏指数 Kidney index	0.87^{b}	0.90^{ab}	0.87^{b}	0.98^{a}	0.97^{a}	0.93^{ab}	0.014	0.008	0.970
肺脏指数 Lung index	0.80^{ab}	0.76^{ab}	0.76^{ab}	0.73^{b}	0.82^{a}	0.78^{ab}	0.010	0.554	0.111

2.3　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠养分利用率的影响

由表6可知，与Ⅰ组比较，Ⅱ组大鼠的CP、EE、CF、NDF、ADF、钙利用率均极显著降低（$P<0.01$），锌利用率显著降低（$P<0.05$）。与Ⅱ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠的EE、锌利用率极显著增加（$P<0.01$）；Ⅴ、Ⅵ组大鼠的CF、NDF、钙利用率极显著增加（$P<0.01$），Ⅳ组大鼠的CF、NDF、钙利用率显著增加（$P<0.05$）；Ⅳ组大鼠的CP、ADF利用率差异不显著（$P>0.05$），Ⅴ组大鼠的CP、ADF利用率极显著增加（$P<0.01$），Ⅵ组大鼠的CP、ADF利用率显著增加（$P<0.05$）。与Ⅲ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠的CP利用率差异不显著（$P>0.05$）；Ⅳ组大鼠的EE利用率显著升高（$P<0.05$），NDF、钙利用率显著降低

（$P < 0.05$），CF、ADF、锌利用率差异不显著（$P > 0.05$）；Ⅴ组大鼠的EE、CF、NDF、ADF、锌、钙利用率均极显著增加（$P < 0.01$）；Ⅵ组大鼠的EE、CF利用率极显著增加（$P < 0.01$），NDF、ADF、锌利用率显著增加（$P < 0.05$），钙利用率无显著差异（$P > 0.05$）。

以上结果表明，先天性缺锌大鼠对养分的利用率受到严重影响。低剂量枯草芽孢杆菌锌能显著增加缺锌大鼠的EE、CF、NDF、锌、钙利用率，中、高剂量枯草芽孢杆菌锌能显著提高缺锌大鼠的EE、CP、ADF、CF、NDF、锌、钙利用率。并且用低剂量枯草芽孢杆菌锌饲喂缺锌大鼠时，EE、NDF、钙利用率高于$ZnSO_4$组；用中、高剂量枯草芽孢杆菌锌饲喂缺锌大鼠时，EE、CF、NDF、ADF、锌、钙利用率高于$ZnSO_4$组。

表 6　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠养分利用率的影响

Table 6　Effects of *Bacillus subtilis*-Zinc on nutrient utilization of congenital zinc deficiency rats　%

项目 Items	组别 Groups						SEM	*P* 值 *P*-value	
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ		线性 Linear	二次 Quadratic
粗蛋白质 CP	0.52^{a}	0.47^{c}	0.50^{ab}	0.48^{bc}	0.51^{a}	0.50^{ab}	0.005	0.975	0.025
粗脂肪 EE	48.05^{b}	43.29^{e}	44.89^{d}	46.90^{c}	51.02^{a}	51.83^{a}	0.751	<0.001	<0.001
粗纤维 CF	19.23^{c}	14.58^{e}	17.18^{d}	17.43^{d}	20.49^{b}	21.24^{a}	0.549	<0.001	<0.001
中性洗涤纤维 NDF	47.81^{c}	44.46^{e}	47.92^{c}	46.44^{d}	55.58^{a}	49.50^{b}	0.854	<0.001	0.030
酸性洗涤纤维 ADF	58.22^{a}	56.30^{c}	56.07^{c}	56.96^{bc}	58.18^{a}	57.93^{ab}	0.245	0.016	0.001
锌 Zn	50.06^{d}	47.85^{e}	50.98^{c}	50.96^{c}	53.65^{a}	52.17^{b}	0.439	<0.001	0.327
钙 Ca	48.63^{b}	43.72^{e}	48.08^{c}	45.44^{d}	52.41^{a}	48.45^{bc}	0.664	<0.001	<0.001

2.4　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠氮利用率的影响

由表7可知，与Ⅰ组比较，Ⅱ组大鼠的食入氮、氮利用率均极显著降低（$P < 0.01$），粪便氮显著升高（$P < 0.05$），沉积氮显著降低（$P < 0.05$）。与Ⅱ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠的粪便氮差异均不显著（$P > 0.05$）；Ⅳ组大鼠的沉积氮、氮利用率差异不显著（$P > 0.05$），食入氮显著增加（$P < 0.05$）；Ⅴ组大鼠的食入氮、沉积氮、氮利用率极显著增加（$P < 0.01$）；

Ⅵ组大鼠的食入氮极显著升高（$P < 0.01$），沉积氮、氮利用率显著升高（$P < 0.05$）。与Ⅲ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠的粪便氮、氮利用率差异不显著（$P > 0.05$）；Ⅳ大鼠的食入氮、沉积氮显著降低（$P < 0.05$），Ⅴ组大鼠的食入氮、沉积氮显著升高（$P < 0.05$）；Ⅵ组大鼠的食入氮、沉积氮差异不显著（$P > 0.05$）。

以上结果表明，先天性缺锌大鼠氮的利用率低，粪氮排泄量升高；枯草芽孢杆菌锌能够促进缺锌大鼠对氮的摄入，降低氮排泄，增加氮沉积，从而提高氮利用率；低、中剂量枯草芽孢杆菌锌能够提高先天性缺锌大鼠食入氮、沉积氮、氮利用率，且作用效果优于$ZnSO_4$。

表 7　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠氮利用率的影响

Table 7　Effects of *Bacillus subtilis*-zinc on nitrogen utilization of congenital zinc deficiency rats

项目 Items	组别 Groups						SEM	*P* 值 *P*-value	
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ		线性 Linear	二次 Quadratic
食入氮 Nitrogen intake/(g/d)	3.01^{c}	2.86^{e}	3.02^{bc}	2.96^{d}	3.17^{a}	3.05^{b}	0.023	<0.001	0.005
粪便氮 Nitrogen excretion/(g/d)	1.44^{b}	1.52^{a}	1.50^{ab}	1.54^{a}	1.54^{a}	1.52^{a}	0.012	0.498	0.262
沉积氮 Deposit nitrogen/(g/d)	1.57^{ab}	1.34^{c}	1.52^{b}	1.42^{c}	1.62^{a}	1.52^{b}	0.024	0.167	0.986
氮利用率 Nitrogen utilization/%	0.52^{a}	0.47^{c}	0.50^{ab}	0.48^{bc}	0.51^{a}	0.50^{ab}	0.005	0.625	0.549

2.5　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠器官中微量元素含量的影响

2.5.1　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠器官中锌含量的影响

由表8可知，与Ⅰ组比较，Ⅱ组大鼠心脏和肾脏中锌含量显著降低（$P < 0.05$），肝脏中锌含量极显著降低（$P < 0.01$），脑中锌含量差异不显著（$P > 0.05$）。与Ⅱ组比较，Ⅳ组大鼠心脏、肝脏、脑、肾脏中锌含量差异不显著（$P > 0.05$），Ⅴ组大鼠心脏、脑、肾脏中锌含量显著提高（$P < 0.05$），肝脏中锌含量极显著增加（$P < 0.01$），Ⅵ组大鼠心脏、肝脏、肾脏中锌含量显著增加（$P < 0.05$），脑中锌含量差异不显著（$P > 0.05$）。与Ⅲ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠脑中锌含量差异不显著（$P > 0.05$），Ⅴ、Ⅵ组大鼠心脏、肾脏中锌含量差异不显著（$P > 0.05$），Ⅳ组大鼠心脏、肾脏中锌含量显著降低（$P < 0.05$）；Ⅳ组大鼠肝脏中锌含量极显著降低（$P < 0.01$），Ⅴ组大鼠肝脏中锌含量显著升高（$P < 0.05$），Ⅵ组大鼠肝脏中锌含量显著降低（$P < 0.05$）。

以上结果表明，大鼠先天性缺锌会影响肝脏、心脏、肾脏中锌的沉积；中剂量枯草芽孢杆菌锌能够快速提高缺锌大鼠心脏、脑、肾脏、肝脏中锌含量，并且其对缺锌大鼠补锌效果

与$ZnSO_4$差异不显著，但降低了锌添加量。

表 8　枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠器官中锌含量的影响

Table 8　Effects of *Bacillus subtilis*-zinc on organ zinc content of congenital zinc deficiency rats　mg/kg

项目 Items	组别 Groups						SEM	*P* 值 *P*-value	
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ		线性 Linear	二次 Quadratic
心脏 Heart	27.02[a]	20.98[b]	26.68[a]	21.89[b]	26.58[a]	26.24[a]	0.609	0.008	<0.001
肝脏 Liver	37.01[ab]	31.29[d]	36.29[b]	31.77[d]	37.24[a]	34.13[c]	0.593	0.670	<0.001
脑 Brain	23.44[ab]	21.66[b]	23.11[ab]	22.24[ab]	23.58[a]	22.79[ab]	0.247	0.721	0.379
肾脏 Kidney	34.65[a]	30.58[b]	33.94[a]	31.35[b]	34.17[a]	34.24[a]	0.407	0.094	<0.001

2.5.2　枯草芽孢杆菌锌对缺锌大鼠器官中铜含量的影响

由表9可知，与Ⅰ组比较，Ⅱ组大鼠心脏、脑、肾脏中铜含量显著降低（$P<0.05$），但肝脏中铜含量极显著增加（$P<0.01$）。与Ⅱ组比较，Ⅳ组大鼠心脏中铜含量显著升高（$P<0.05$），肝脏中铜含量显著降低（$P<0.05$），脑和肾脏中铜含量差异不显著（$P>0.05$）；Ⅴ组大鼠心脏中铜含量极显著升高（$P<0.01$），肝脏中铜含量极显著降低（$P<0.01$），脑和肾脏中铜含量显著升高（$P<0.05$）；Ⅵ组大鼠心脏中铜含量显著增加（$P<0.05$），肝脏中铜含量极显著降低（$P<0.01$），脑和肾脏中铜含量差异不显著（$P>0.05$）。与Ⅲ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠肾脏中铜含量差异不显著（$P>0.05$），Ⅳ、Ⅵ组大鼠心脏中铜含量差异不显著（$P>0.05$），脑中铜含量显著降低（$P<0.05$）；Ⅴ组大鼠心脏中铜含量显著增加（$P<0.05$），脑中铜含量差异不显著（$P>0.05$）；Ⅳ组大鼠肝脏中铜含量显著增加（$P<0.05$），Ⅴ、Ⅵ组大鼠肝脏中铜含量差异不显著（$P>0.05$）。

以上结果表明，大鼠先天性缺锌导致心脏、脑、肾脏、肝脏中铜元素沉积量减少；低剂量枯草芽孢杆菌锌能够促进先天性缺锌大鼠心脏中铜的沉积，降低肝脏中铜的沉积；中剂量枯草芽孢杆菌锌能够促进先天性缺锌大鼠脑和肾脏中铜的沉积；枯草芽孢杆菌锌对缺锌大鼠心脏中铜含量的修复效果优于$ZnSO_4$。

表 9 枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠器官中铜含量的影响

Table 9 Effects of *Bacillus subtilis*-zinc on organ copper content of congenital zinc deficiency rats mg/kg

项目 Items	组别 Groups						SEM	*P* 值 *P*-value	
	I	II	III	IV	V	VI		线性 Linear	二次 Quadratic
心脏 Heart	3.67[b]	3.50[c]	3.68[b]	3.71[b]	3.79[a]	3.69[b]	0.023	<0.001	0.796
肝脏 Liver	3.14[c]	4.46[a]	3.14[c]	4.13[b]	3.24[c]	3.10[c]	0.134	<0.001	<0.001
脑 Brain	2.34[a]	2.02[b]	2.37[a]	2.07[b]	2.51[a]	2.01[b]	0.054	0.474	0.421
肾脏 Kidney	5.23[a]	5.17[b]	5.21[ab]	5.16[b]	5.24[a]	5.22[ab]	0.010	0.468	0.071

2.5.3 枯草芽孢杆菌锌对缺锌大鼠器官中铁含量的影响

由表10可知，与Ⅰ组比较，Ⅱ组大鼠心脏中铁含量显著降低（$P<0.05$），肝脏、肾脏中铁含量极显著降低（$P<0.01$），脑中铁含量差异不显著（$P>0.05$）。与Ⅱ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠心脏、肝脏、肾脏中铁含量显著或极显著增加（$P<0.05$或$P<0.01$），脑中铁含量差异不显著（$P>0.05$）。与Ⅲ组比较，Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ组大鼠脑中铁含量差异不显著（$P>0.05$），肝脏中铁含量显著或极显著降低（$P<0.05$或$P<0.01$）；Ⅴ、Ⅵ组大鼠肾脏中铁含量显著增加（$P<0.05$），Ⅳ组大鼠肾脏中铁含量显著降低（$P<0.05$）；Ⅳ、Ⅵ组大鼠心脏中铁含量差异不显著（$P>0.05$），Ⅴ组大鼠心脏中铁含量显著增加（$P<0.05$）。

以上结果表明，大鼠先天性缺锌影响心脏、肝脏、肾脏中铁的沉积；枯草芽孢杆菌锌能够通增加先天性缺锌大鼠心脏、肝脏、肾脏中铁吸收快速补充相应器官中铁的含量，并且枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠肝脏、肾脏中铁含量的修复效果优于$ZnSO_4$。

表 10 枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠器官组织铁含量的影响

Table 10 Effects of *Bacillus subtilis*-zinc on organ iron content of congenital zinc deficiency rats mg/kg

项目 Items	组别 Groups	SEM	*P* 值 *P*-value

	I	II	III	IV	V	VI		线性 Linear	二次 Quadratic
心脏 Heart	120.89[c]	115.30[d]	121.34[bc]	122.29[b]	124.07[a]	122.60[b]	0.687	<0.001	0.349
肝脏 Liver	206.88[a]	168.16[f]	198.21[b]	170.57[e]	182.42[d]	183.25[c]	3.366	<0.001	<0.001
脑 Brain	32.89[a]	31.94[ab]	31.64[b]	31.88[ab]	31.78[ab]	31.82[ab]	0.156	0.081	0.098
肾脏 Kidney	124.46[a]	109.14[d]	120.46[b]	111.50[c]	123.41[a]	123.69[a]	1.504	<0.001	<0.001

3 讨 论

3.1 枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠生长发育的影响

Doboszewska等[12]和Shah等[13]研究发现，大鼠孕期缺锌，会降低自身免疫力，影响采食量，也会影响胎儿的生长发育，降低代谢。Doboszewska等[12]和Fukada等[14]研究表明，缺锌可引起生长期大鼠体重、体长、胫骨长度生长缓慢、摄食量减少，食物利用率降低。本研究发现，大鼠先天性缺锌会显著降低采食量，影响心脏、肝脏等器官发育，使生长发育缓慢，体重降低。张庆[15]研究表明，混合锌能够显著提高仔猪胸腺、脾脏、胰脏指数。王代刚[8]研究锌源对缺锌大鼠生长性能的影响时发现，酵母锌可提高大鼠ADFI、ADG，降低F/G。在本试验条件下，枯草芽孢杆菌锌组大鼠体重、ADG、ADFI以及心脏和肝脏指数均高于缺锌组，并且中、高剂量枯草芽孢杆菌锌对缺锌大鼠心脏修复效果优于$ZnSO_4$，低、中剂量枯草芽孢杆菌锌对缺锌大鼠肾脏修复效果也优于$ZnSO_4$。这表明枯草芽孢杆菌锌在一定浓度下能够促进缺锌大鼠的生长发育，并且对缺锌大鼠生长发育改善效果优于$ZnSO_4$。

3.2 枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠养分利用率的影响

Murugesan 等[16]和冯定远等[17]研究表明，动物良好的生长性能取决于对饲粮营养物质的充分消化、吸收与利用。刘英丽[18]研究表明，酵母锌的生物利用率显著高于硫酸锌。郭建来等[19]研究表明，与无机锌组相比，有机锌组显著提高了仔猪干物质、钙和磷利用率，极显著提高了粗灰分利用率。本试验研究发现，枯草芽孢杆菌锌具有快速补锌，增加养分利用率的作用，这与枯草芽孢杆菌锌能够改善缺锌大鼠生长性能结果一致。此外，研究也表明，枯草芽孢杆菌锌组大鼠氮等养分利用率增高，排泄率减少，降低了对环境的污染，进一步说明枯草芽孢杆菌锌作为生态型饲料添加剂具有重要的研究意义。

3.3 枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠器官中微量元素含量的影响

锌缺乏不仅导致动物体内锌水平降低，还会影响对其他微量元素的转运和生物利用率[20]。袁秀琴等[21]研究发现，缺锌使大鼠血清、肝脏、脾脏、肾脏等中锌和铁的含量显著降低，肾脏、脾脏中铜含量降低。赵长峰等[22]、Zhao 等[22]研究表明，缺锌组孕鼠各组织中锌水平和其他微量元素含量均显著低于补锌组和对照组。孔林[24]研究表明，在锌水平足够的条件下，酵母锌和硫酸锌对小鼠生长性能和组织锌含量影响差异不显著。本试验用枯草芽孢杆菌锌干预先天性缺锌大鼠，发现其对先天性缺锌大鼠心脏、肝脏、脑和肾脏等器官中微量元素含量具有调节作用；并且中剂量枯草芽孢杆菌锌能够促进器官中微量元素的吸收，这可能与枯草芽孢杆菌锌具备双重功能有关，该菌不仅具有补锌的功能，而且还能够促进养分消化吸收，提高大鼠采食量，使铜、锌和铁等微量元素利用率提高，吸收增多，组织器官中沉积量也增多。本试验结果还表明，高剂量枯草芽孢杆菌锌的作用效果低于中剂量枯草芽孢杆菌锌，说明机体锌需要量有一定阈值范围，过高锌水平不利于养分消化吸收利用。

4 结 论

① 大鼠饲粮中添加枯草芽孢杆菌锌能够显著增加先天性缺锌大鼠的采食量，提高肝脏指数、心脏指数和养分利用率，促进生长发育，调节微量元素的分布。

② 枯草芽孢杆菌锌对先天性缺锌大鼠后天干预修复效果优于 $ZnSO_4$。

③ 中剂量枯草芽孢杆菌锌组比$ZnSO_4$组修复效果更好，且降低了饲粮中锌添加量。

参考文献

[1] 王成贵.生物锌与有机锌对幼儿生长发育影响的研究[J].中国热带医学,2009,9(3):580–581.

[2] 潘丽新,闫秀娟,郎英杰,等.生物锌对幼儿生长发育影响的研究[J].中国热带医学,2006,6(1):208–209.

[3] SHAH D S,SACHDEV H P S.Zinc Deficiency in pregnancy and fetal outcome[J].Nutrition Reviews,2006,64(1):15–30.

[4] 刘军,李晓雯,张希洲,等.锌酵母与有机锌对儿童生长发育影响的研究[J].中国食品卫生杂志,2004,16(4):329-333.

[5] 曾芳,何晓宇.孕期高同型半胱氨酸、缺锌与先天性心脏病[J].中国妇幼健康研究,2007,18(2):129–131.

[6] 王德才,徐红岩,周序斌,等.复合蛋白锌对大鼠生长发育及组织核酸和蛋白质代谢的影响[J].中国行为医学科学,2003,12(5):498–499,524.

[7] WEDEKIND K J,HORTIN A E,BAKER D H.Methodology for assessing zinc bioavailability: fficacy estimates for zinc-methionine, zinc sulfate, and zinc oxide[J].Journal of Animal Science,1992,70(1):178.

[8] 王代刚.酵母菌富集微量元素锌和酵母锌生物学效价的研究[D].硕士学位论文.雅安:四

川农业大学,2004.
[9] 崔志英,叶雪芳.有机微量元素和无机微量元素生物利用率的对比[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会论文集.北京：中国畜牧兽医学会动物营养学分会,2010.
[10] 郭雪娜,崔黎,王肇悦,等.富集微量元素的功能酵母研究概况及应用前景[J].食品与发酵工业,2009,35(4):124–127.
[11] 赵佳英,康德灿,高永峰,等.微生物富集有益元素食品的研发概况与展望[J].食品研究与开发,2017,38(12):206–210.
[12] DOBOSZEWSKA U,SZEWCZYK B,SOWA-KUĆMA M,et al.Alterations of bio-elements,oxidative,and inflammatory status in the zinc deficiency model in rats[J].Neurotoxicity Research,2016,29:143–154.
[13] SHAH D,SACHDEV H P S.Effect of gestational zinc deficiency on pregnancy outcomes:summary of observation studies and zinc supplementation trials[J].British Journal of Nutrition,2001,85(S2):S101–S108.
[14] FUKADA T,HOJYO S,BIN B H.Zinc signal in growth control and bone diseases[M]//FUKADA T,KAMBE T.Zinc Signals in Cellular Functions and Disorders.Tokyo:Springer,2014:249–267.
[15] 张庆.不同锌源及添加水平对断奶仔猪微量元素代谢与锌相关基因表达的影响[D].硕士学位论文.泰安:山东农业大学,2017.
[16] MURUGESAN G R,ROMERO L F,PERSIA M E.Effects of protease,phytase and a *Bacillus* sp.direct-fed microbial on nutrient and energy digestibility,ileal brush border digestive enzyme activity and cecal short-chain fatty acid concentration in broiler chickens[J].PLoS One,2014,9(7):e101888.
[17] 冯定远,邓小云.昆明小鼠、NIH小鼠和Wistar大鼠对营养物质消化利用率的研究[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会——第九届学术研讨会论文集.重庆:中国农业科学技术出版社,2004.
[18] 刘英丽.肉仔鸡不同锌源、铜源生物利用率的研究[D].硕士学位论文.武汉:华中农业大学,2004.
[19] 郭建来,李梦云,朱宽佑,等.添加不同比例复合有机微量元素对仔猪生产性能、养分利用率及血清生化指标的影响[J].饲料工业,2014,35(19):18–21.
[20] SAUER A K,HAGMEYER S,GRABRUCKER A M.Zinc deficiency[EB/OL].(2016-07-20)[2018-04-15]https://www.intechopen.com/books/nutritional-deficiency/zinc-deficiency.
[21] 袁秀琴,李东阳,陈淑兰,等.缺锌及补锌对大鼠体内元素分布和血脂的影响[J].中国动脉硬化杂志,2003,11(增刊):606–608.
[22] 赵长峰,杨洪旗,姜会敏,等.锌缺乏对孕鼠及其胎鼠体内元素分布的影响[J].卫生研究,2001,30(5):277–279.
[23] ZHAO C F,YANG H Q,JIANG H M,et al.Effects of zinc deficiency on the distribution of elements in the tissue of pregnant rats and their fetuses[J].Journal of Hygiene Research,2001,35(5):277–279.
[24] 孔林.富锌酵母的选育培养及酵母锌的营养学评价[D].硕士学位论文.武汉:华中农业大学,2006.

Effects of *Bacillus subtilis*-Zinc on Growth Development, Organ Index, Nutrient Utilization and

Organ Trace Elements Content of Congenital Zinc Deficiency Rats

HUANG Yanping[1,2] WANG Baowei[1,2*] LIU Guodong[1,2] GE Wenhua[2] ZHANG Ming' ai[1,2] YUE Bin[2]

（1. *Food Science and Engineering of Qingdao Agricultural University*, *Qingdao* 266109, *China*;

2. *National Waterfowl Industrial Technology System Nutrition and Feed Function Laboratory*, *Qingdao*, 266109, *China*)

Abstract: This experiment was conducted to study the effects of *Bacillus subtilis*-zinc on growth development, organ index, nutrient utilization and organ trace elements (zinc, copper and iron) content of congenital zinc deficiency rats, and to determine the feeding effects of *Bacillus subtilis*-zinc and feasibility of the trace elements reduction. The same pregnancy period rats were selected for the model establishment experiment of congenital zinc deficiency rats, rats in the model group were fed a low zinc diet (zinc level was 13 mg/kg) and rats in the control group were fed a normal diet (zinc level 38 mg/kg), from 10 days after pregnancy to the end of lactation. After that, eighteen 24-day-old normal juvenile rats from the control group in the model establishment experiment were selected as a normal group (group Ⅰ, zinc level was 13 mg/kg), and fed a normal diet; in addition, ninety 24-day-old congenital zinc deficiency juvenile rats from the model group in the model establishment experiment were selected and randomly divided into 5 experimental groups, which were zinc deficiency group (group Ⅱ, zinc level was 13 mg/kg), zinc sulfate ($ZnSO_4$) group (group Ⅲ, zinc level was 38 mg/kg), low-dose *Bacillus subtilis*-zinc group (group Ⅳ, zinc level was 15 mg/kg), mid-dose *Bacillus subtilis*-zinc group (group Ⅴ, zinc level was 30 mg/kg) and high-dose *Bacillus subtilis*-zinc group (group Ⅵ, zinc level was 45 mg/kg), respectively, and fed low zinc diets; there were 3 replicates in each group and 6 rats in each replicate. The experiment lasted for 5 weeks. The results showed as follows: 1) compared with group Ⅰ, the body weight (BW) and average daily feed intake (ADFI) of group Ⅱ were significantly decreased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅱ, the BW and ADFI of groups Ⅳ, Ⅴ and Ⅵ were significantly increased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅲ, the BW, average body gain (ADG) and ADFI of group Ⅴ were significantly increased ($P < 0.05$). 2) Compared with group Ⅰ, the liver index of group Ⅱ was significantly decreased ($P < 0.05$). Compared with group Ⅱ, the heart index and liver index of groups Ⅴ and Ⅵ were significantly increased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅲ, the heart index of group Ⅵ were significantly increased ($P < 0.05$), the heart index and kidney index of group Ⅴ were significantly increased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$), the kidney index of group Ⅳ were significantly increased ($P < 0.05$). 3) Compared with group Ⅰ, the utilizations of crude protein (CP), crude fat (EE), crude fiber (CF), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), calcium and zinc of group Ⅱ were significantly decreased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅱ, the utilizations of CP, CF, EE NDF ADF, calcium and zinc of groups Ⅴ and Ⅵ were significantly increased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅲ, the EE utilization of group Ⅳ was significantly increased ($P < 0.05$), the utilizations of EE, CF, NDF ADF, calcium and zinc of group Ⅴ were significantly increased ($P < 0.01$), the utilizations of EE, CF, NDF

*Corresponding author, professor, E-mail: wangbw@qau.edu.cn （责任编辑 武海龙）

ADF and zinc of group Ⅵ were significantly increased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). 4) Compared with group Ⅰ, the nitrogen intake, deposit nitrogen and nitrogen availability of group Ⅱ were significantly decreased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅱ, the nitrogen intake, deposit nitrogen and nitrogen availability of groups Ⅴ and Ⅵ were significantly increased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅲ, the nitrogen intake, deposit nitrogen of group Ⅳ were significantly decreased ($P < 0.05$), the nitrogen intake, deposit nitrogen of group Ⅴ were significantly increased ($P < 0.05$). 5) Compared with group Ⅰ, the contents of zinc in heart, liver and kidney of group Ⅱ were significantly decreased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅱ, the contents of zinc in heart, liver and kidney of groups Ⅴ and Ⅵ were significantly increased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅲ, the contents of zinc in heart and kidney of group Ⅳ were significantly decreased ($P < 0.05$), the liver zinc content of groups Ⅳ and Ⅵ was significantly decreased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). 6) Compared with group Ⅰ, the contents of copper in heart, brain and kidney of group Ⅱ were significantly decreased ($P < 0.05$). Compared with group Ⅱ, the heart copper content of groups Ⅳ, Ⅴ and Ⅵ was significantly increased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅲ, the brain copper content of groups Ⅳ and Ⅵ was significantly decreased ($P < 0.05$), the heart copper content of group Ⅴ was significantly increased ($P < 0.05$). 7) Compared with group Ⅰ, the contents of iron in heart, liver and kidney of group Ⅱ were significantly decreased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅱ, the contents of iron in heart, liver and kidney of groups Ⅳ, Ⅴ and Ⅵ were significantly increased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with group Ⅲ, the liver iron content of groups Ⅳ, Ⅴ and Ⅵ were significantly decreased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). In conclusion, *Bacillus subtilis*-zinc can promote the growth and development of congenital zinc deficiency rats, improve liver index, heart index and nutrient utilization, regulate the distribution of trace elements, the effects are better than $ZnSO_4$, and reduce the addition amount of zinc in the diet

Key words: *Bacillus subtilis*-zinc; congenital zinc deficiency; growth and development; nutrient utilization; trace elements